

ли по ходу процесса, более полно отражающего неравномерность выхода металла в стенку стакана (погрешность не превышает 10 % при величине хода  $h_x > 7$  мм.).

**Список литературы:** 1. Алиев И.С. Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания // Кузнечно – штамповочное производство. -1990. - №2. – С. 7 – 9. 2. Алиев И.С., Солодун Е.М., Крюгер К. Моделирование процессов комбинированного выдавливания // Механика деформированного твёрдого тела и обработка металлов давлением. Сборник научных трудов. – Тульский гос. унив-т. Тула, 2000, С.21-27. 3. Алиев И.С., Грудкина Н.С. Теоретический анализ процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания.//Обработка металлов давлением. Сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2008.-№1(19) - С.55-60. 4. Алиев И. С. Определение сил раскрытия оправки при радиальном выдавливании внутренних фланцев/ И.С. Алиев, Н.С. Грудкина, С.В. Мартынов // Обработка материалов давлением: сб. науч. пр. - Краматорськ: ДДМА. - 2009. - № 1 (20). - С. 30-35. - Библиогр.: с. 35. - ISBN 978-966-379-325-2.

**УДК 621.777.4**

***ВАСИЛЬЕВ К.И., СОЛОВЬЕВ М.В., ШАРАПОВ К.М.***

Кафедра «Системы пластического деформирования» МГТУ «СТАНКИН»

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ОТКРЫТОЙ ОСАДКЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕЩИНЫ НА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ.**

Экспериментальными исследованиями показано формирование «осадочного креста» и объяснены причины его возникновения. Показано, что можно связать между собой характеристики материала, полученные при испытании на разрыв, и величину предельно-допустимой осевой деформации. Полученные зависимости позволяют прогнозировать получение предельных геометрических размеров поковок без проведения дополнительных испытаний на осадку.

Традиционно принято считать, что бочкообразная форма при осадке цилиндрической заготовки объясняется наличием сил контактного трения между плитами и деформируемой заготовкой. В настоящей работе предлагается несколько иное объяснение неравномерности деформации при осадке.

После травления стальных осажённых заготовок в их поперечном сечении выявляется «осадочный крест», границы которого являются линиями интенсивных сдвиговых деформаций – линиями разрыва скоростей [1,2] (рис. 1).

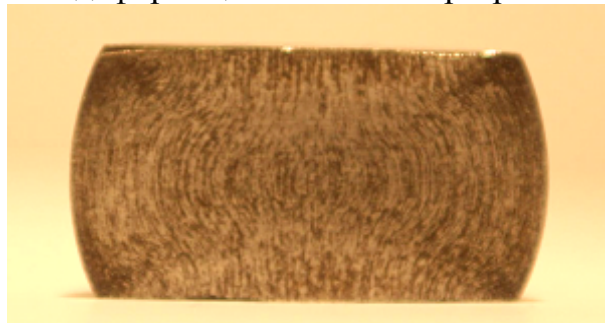


Рис. 1. «Осадочный крест» в меридиональном сечении осажённой цилиндрической заготовки.

На начальном этапе осадки такой эффект в меридиональном сечении не наблюдается из-за незначительных сдвиговых деформаций в указанной зоне, хотя в соответствии с теорией линий скольжения [1, 2] подобное явление может иметь место. Поэтому процесс холодной осадки цилиндрической заготовки можно условно разделить на 2 фазы:

1. Развитие «жесткого» клина, границы которого определяются линией контакта с инструментом и линиями разрыва скоростей, проходящими из крайней точки контакта деформируемой заготовки с инструментом под углом  $45^\circ$  к этой линии контакта. В результате застойная зона («жесткий клин») имеет форму конуса, боковыми границами которого являются поверхности разрыва скоростей.

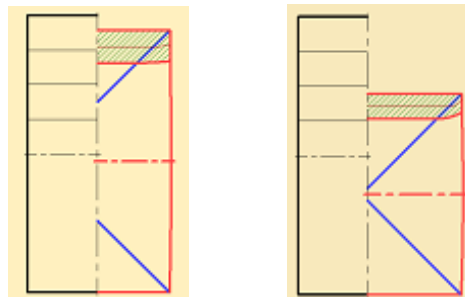


Рис.2. Первая фаза осадки – развитие «жесткого клина».

В процессе деформирования объем клина увеличивается, а металл в периферийной зоне выдавливается клином в поперечном направлении. Первая фаза осадки продолжается до тех пор, пока вершины клиньев не сомкнутся. Это произойдет в момент, когда текущая высота осаживаемой цилиндрической заготовки станет равной длине линии контакта с инструментом.

2. После смыкания вершин «жестких клиньев - конусов» начинается вторая фаза осадки – фаза интенсивного бочкообразования. Угол при основании «жестких клиньев» меняется, но объемы конических клиньев в течение этой фазы остаются постоянными. Угол клиньев при вершине начинает увеличиваться (от  $90$  градусов), а угол линии разрыва скоростей (границ интенсивных сдвиговых деформаций)

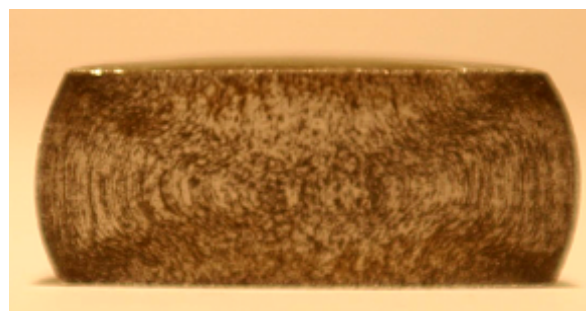


Рис. 3. Увеличение угла клина при вершине во второй фазе осадки.

с линий контакта с инструментом начинает уменьшаться (рис. 3,4).

Металл в периферийной зоне также выдавливается клином в поперечном направлении, но т.к. угол клина непрерывно уменьшается, то имеет место интенсивное увеличение усилия деформирования (вследствие увеличения сил трения на линиях разрыва скоростей), и интенсивно увеличивается бочкообразность осаживаемой заготовки.

В процессе осадки цилиндрической заготовки максимальный диаметр бочки увеличивается и элементы, выделенные в экваториальном сечении, подвергаются интенсивным растягивающим деформациям.

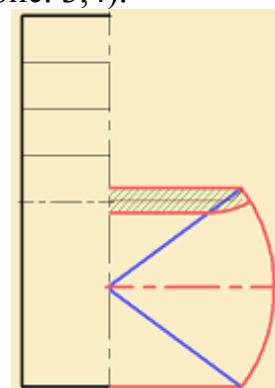


Рис. 4. Компьютерная графическая модель, иллюстрирующая изменение угла клина при вершине при осадке цилиндрической заготовки.

При разработке технологических процессов технологу часто необходимо знать предельно-допустимую величину относительной деформации  $[\epsilon]$ , после превышения которой возникает трещина на свободной боковой поверхности. Обычно исследователи и технологи судят о вероятности появления трещины на свободной боковой поверхности осаживаемой заготовки по величине напряжения, значение которого необходимо вычислить по тем или иным зависимостям, иногда достаточно сложным, в то

время как геометрические размеры заготовки до деформирования и размеры осаженой заготовки после деформирования всегда известны и не представляет труда вычислить значение относительной деформации в результате выполнения операции, и по этой величине судить о вероятности возникновения трещины на свободной боковой поверхности. Однако, в справочной литературе предельно допустимые величины относительных деформаций обычно отсутствуют [3, 4, 5]. В большинстве справочников приводятся значения предела текучести  $\sigma_t$  ( $\sigma_{02}$ ), предела прочности  $\sigma_b$  и значения относительного удлинения  $\delta$  и относительного сужения  $\psi$  после разрыва [3, 4, 5].

Для выяснения способности черного или цветного металла к деформированию проводят дополнительные испытания на осадку (ГОСТ 8817-73). Метод испытания на осадку прутков и проволоки черных металлов и алюминиевых сплавов предназначен для определения их способности к деформированию и для выявления дефектов поверхности в холодном (2...30 мм.) или горячем (5...150 мм.) состояниях. Образцы диаметром, равным диаметру будущей деформируемой заготовки, и длиной, равной двум диаметрам для черных металлов и полутора диаметрам для алюминиевых сплавов, осаживают под прессом или молотом. Величину осевой относительной деформации принимают равной 50, 65, 75% для черных металлов 50% для алюминиевых сплавов [5]. Считают, что образец выдержал испытания, если после деформирования на его поверхности отсутствуют трещины, разрывы и расслоения [5].

Как видно из приведенного материала, регламентируется только 3 числовых значения продольной (осевой) относительной деформации  $\varepsilon_z$  и не определяют числовых значений тангенциальной  $\varepsilon_t$  и радиальной  $\varepsilon_r$  относительных деформаций. А между тем, именно превышение предельно-допустимой величины относительной тангенциальной деформации  $[\varepsilon_t]$  и приводит к образованию трещины на свободной боковой поверхности при открытой осадке.

Представляется заманчивым и целесообразным связать вероятность появления трещины на боковой поверхности при открытой осадке с характеристиками материала, получаемыми при испытаниях на растяжение и приведенных в различных справочниках.

Определим величину предельно-допустимой относительной деформации на растяжение как

$$[\varepsilon_p] = k \cdot \delta, \quad (1)$$

где

$\delta$  - относительное удлинение образца после разрыва при испытании на растяжение [1],

$k$  – некоторый коэффициент, значение которого будет определено ниже.

Как известно, при свободной осадке участки, лежащие на свободной бочкообразной поверхности, подвергаются растягивающим деформациям. Поэтому, предельно-допустимую величину тангенциальной деформации  $[\varepsilon_t]$  можно записать как:

$$[\varepsilon_t] = [\varepsilon_p] \leq k \cdot \delta; \quad (2)$$

Относительное увеличение длины окружности свободной бочкообразной поверхности по экватору (относительная тангенциальная деформация) для цилиндрических заготовок может быть определено как:

$$\varepsilon_t = \frac{\pi D - \pi d}{\pi d} = \frac{D - d}{d} = \frac{D}{d} - 1, \quad (3)$$

где

$D$  – максимальный диаметр осажженной поковки по экватору,

$d$  – диаметр исходной заготовки.

Относительное увеличение радиуса по экватору (относительная радиальная деформация) определяется:

$$\varepsilon_r = \frac{R - r}{r} = \frac{R}{r} - 1 = \frac{D}{d} - 1 = \varepsilon_t \quad (4)$$

где

$R$  – максимальный радиус осажженной заготовки по экватору,

$r$  – радиус исходной заготовки.

Таким образом, при открытой осадке цилиндрических заготовок относительная тангенциальная деформация и относительная радиальная деформация равны друг другу. Поэтому можно записать:

$$[\varepsilon_r] = [\varepsilon_t] \leq k \cdot \delta; \quad (5)$$

Далее

$$[\varepsilon_t] = \frac{D}{d} - 1 \leq k \cdot \delta; \quad (6)$$

Отсюда

$$\frac{D}{d} \leq 1 + k \cdot \delta; \quad (7)$$

и

$$D \leq d(1 + k\delta) \quad (8)$$

Величину относительного удлинения при разрыве  $\delta$  можно считать предельным значением относительной осевой деформации при растяжении, превышение которой приводит к разрушению материала при статических нагружениях, т.е. значение коэффициента  $k$  в (2) должно быть меньше единицы, но не существенно отличаться от нее.

Для сталей марок сталь Ст.3, сталь 10, сталь 15 значение относительного удлинения при разрыве, приведенные в различных справочниках [3, 4, 5] составляет 26% (0,26). Поэтому с остаточной долей уверенности можно назначить значение допустимой тангенциальной деформации на 1...2 % меньше, чем значение относительного удлинения при разрыве  $\delta$ :

$$[\varepsilon_t] = \delta - (1...2)$$

и для упомянутых сталей эта величина будет равна:

$$[\varepsilon_t] = 24 \% (0,24).$$

Из условия постоянства объема для осесимметричных деталей имеем:

$$\varepsilon_z = -2 \varepsilon_t.$$

Значит

$$[\varepsilon_z] = -2 [\varepsilon_t]$$

и соответственно будет равна 0,48 (48 %). Знак минус говорит о разнонаправленности деформаций.

В результате значение коэффициента  $k$  (коэффициента запаса) равно 0,93.

Полученное значение допустимой относительной осевой деформации при открытой осадке говорит о том, что при уменьшении высоты заготовки в 2 раза при ее холодной осадке возможно возникновение трещины на свободной боковой поверхности.

Несложно получить выражение для вычисления предельно возможной высоты осаженной заготовки при ее холодной осадке:

$$H > h(1 - 2k\delta),$$

где

$h$  – высота исходной заготовки,

$k$  – коэффициент запаса, равный 0,92...0,94,

$\delta$  - значение относительного удлинения материала при испытании на разрыв и приводимое в различных справочниках,

$H$  – предельное значение высоты осаженной заготовки при ее холодной осадке.

Уменьшение значения  $k$  приведет к недоиспользованию ресурса пластичности материала, увеличение может привести к возникновению непрогнозируемой трещины на свободной боковой бочкообразной поверхности осаженной заготовки. Поэтому значение  $k$  желательно принимать из диапазона [0,92...0,94].

#### Выводы

1. Показано, что можно связать между собой характеристики материала, полученные при испытаниях на разрыв, и величину предельно-допустимой осевой деформации.

2. Получены зависимости, связывающие между собой предельно-допустимые значения радиальной, осевой и тангенциальной относительных деформаций с величиной относительного удлинения при разрыве.

3. Полученные зависимости позволяют прогнозировать получение предельных геометрических размеров поковок без проведения дополнительных испытаний материала на осадку.

**Список литературы:** 1. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. М. Машиностроение, 1979, 215 с. 2. Шофман Д.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки. – М.: «Машиностроение», 1964. 3. Марочник сталей и сплавов. Справочник. Под ред. Зубченко А.С. М., Машиностроение-1, 2003 г., 782 с. 4. Ковка и штамповка. Справочник. Под ред. Семенова Е.И., т.1. М., Машиностроение, 1985 г., 567 с. 5. Справочник металлста. Т2. М., Машиностроение, 1976 г., 717 с.

#### УДК 621.7.044

**В.В. ТРЕТЬЯК**, канд. техн. наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

#### ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Рассмотрены особенности алгоритмов проектирования новых технологических процессов для изготовления сложных листовых деталей авиационных двигателей. Представлены причины и классификация брака при изготовлении деталей импульсными способами. Рассмотрена концепция и алгоритм анализа и синтеза с элементами аналогов для импульсной технологии. Представлено объектное описание структуры детали и ТП. Представлен алгоритм и описание программы для классификационной обработки данных при проектировании ТП.

**Ключевые слова:** импульсная объемная штамповка, анализ и синтез ТП, классификационная обработка данных

Розглянуті особливості алгоритмів проектування нових технологічних процесів для виготовлення складних листових деталей авіаційних двигунів. Представлені причини і класифікація